磁性流体の乱流抵抗に関する一考察*

松野善之^{*1}, 伊藤潤^{*2}
太田恵^{*3}, 宮本卓哉^{*4}

Flow Resistance of Magnetic Fluid in Turbulent Region

Yoshiyuki MATSUNO, Jun ITOH,
Hisashi OHTA and Takuya MIYAMOTO

This paper presents experimental research on the flow resistance of a magnetic fluid in a turbulent region. The flow resistance is tested using a two-dimensional channel in which the effect of interaction between magnetic field and flow vorticity on the flow resistance can be evaluated. As a result, the mechanism of decrease in the flow resistance in a turbulent region is clarified.

Key Words: Magnetic Fluid, Flow Resistance, Turbulent Region, Two-Dimensional Channel, Interaction

1. 緒 言

磁性流体の磁場の作用下における流動抵抗は層流域に関してはすでに多くの研究結果が報告されて、その内容がほぼ明らかにされている。他方、乱流域に関しては実用上その応用が多いと考えられるにもかかわらず、報告された結果は意外に少ない⁽¹⁾⁽²⁾。著者は先に層流域の流動における磁場と渦度の干渉に関して二次元流路を用いてその作用を求め、流動抵抗に関する考察を行ったが、その手法を乱流域に拡張して流動抵抗の検討を行った。

2. おもな記号

 D_w : 壁面せん断速度 h : 二次元流路高さ H : 磁場 K : べき乗則における定数 L : 圧力損失を求める流路長さ n : べき乗則における指数 Δp : 圧力損失 Re : レイノルズ数 u : 軸方向流速 u' : 軸方向変動流速 U_m : 二次元流路内平均流速 v' : 軸方向に直角方向の変動流速 y : 軸方向に垂直方向の座標 θ : 二次元流路の渦度と磁場がなす角度 λ : 摩擦損失係数 μ : 磁性流体の粘性係数 ρ : 磁性流体の密度 τ : 全せん断抵抗 τ_m : 磁場と渦度の干渉に起因するせん断抵抗 τ_w : 壁面せん断抵抗 ω : 二次元流路における渦度

3. 乱流抵抗への二次元流路の応用

層流域における流動抵抗へ及ぼす磁場の作用は、磁場と流れの渦度との干渉効果によって説明することが可能であり⁽³⁾、二次元流路において両者が直交し、その干渉が最大になるときに流動抵抗は最大になり、両者が平行になってその干渉が消滅するときに、流動抵

* 原稿受付 1995年5月19日。

^{*2} 正員, 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪2-39-1)。^{*3} 准員, スズキ(株) (〒432 91 浜松市高塚町300)。^{*4} 日本コムシス(株) (〒108 東京都港区高輪3-23-14)。^{**} (株)三井三池製作所 (〒103 東京都中央区日本橋室町2-1-1)。

抗は最少になる。一様磁場の作用化における乱流域での流れのせん断抵抗は近似的に次式により表すことができると思われる。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} + (-\rho u'v') + \tau_m \quad \dots\dots\dots (1)$$

上述の乱流抵抗においても速度分布自体は層流の場合とは異なってくるが、磁場と渦度の干渉効果は定性的には層流抵抗の場合と同様であると考えられる。層流域との差異は式(1)の右辺第2項に及ぼす磁場の影響度である。

したがって層流域の場合と同様、磁場と渦度の干渉を効果的に変えることが可能な二次元流路を用いて、乱流抵抗について検討することが有効であると思われる。

4. 試験方法

図1に試験装置の系統図を示す。本装置の詳細については既発表の論文⁽³⁾に説明しているが、図1に示す⑧の試験流路に二次元流路を用い、電磁石⑬によって流路に直角方向に磁場を作用させる。二次元流路は中心軸のまわりに回転できる構造となっており、その結果図2に示す磁場と渦度の交差角 θ は0°から90°まで変えることが可能である。二次元面に磁場を直交させると、磁場と渦度が直交し、他方二次元面と磁場の方向を平行にすることにより磁場と渦度が平行になる。

Fig. 1 Test apparatus

Fig. 2 Intersect angle θ between the magnetic field and flow channel

試験条件としては磁場強さは一様として磁場と渦度がなす角度 θ を0, 45, 90°の三とおりに選び、また流路内の流れを層流域から乱流域まで変化させて圧力損失を求めた。使用した磁性流体は水ベースの磁性体微粒子体積濃度が10%のものであるが、乱流域までの試験を行うためにこれを水で希釈して、体積濃度を6%および3.8%に調整し、試験に供した。表1に希釈磁性流体の主要物性を示している。

5. 試験結果および考察

5.1 試験結果の整理方法 試験結果はせん断速度とせん断抵抗、ならびにレイノルズ数と摩擦損失係数の関係によって整理したが、それぞれの値は次式を用いて求めている⁽³⁾。

$$\text{せん断速度} \quad D_w = \frac{2n+1}{3n} \frac{6U_m}{h} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{せん断抵抗} \quad \tau_w = \frac{h\Delta p}{2L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{レイノルズ数} \quad Re = \frac{\rho U_m^{2-n} n^{n-1} h^n}{2^{n-2} K (2n+1)^{n-1}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{摩擦損失係数} \quad \lambda = \frac{\Delta p}{L} \frac{D_w^2}{\rho \frac{U_m^2}{2}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(2)、(4)における n , K の値は層流域におけるせん断抵抗を次の式(6)によって整理したときの値である。

$$\tau_w = K D_w^n \quad \dots\dots\dots (6)$$

5.2 試験結果および考察 図3～5に濃度6%の磁性流体を用い磁場と流路の交差角を0, 45, 90°に変えた場合の試験結果をせん断速度とせん断抵抗の関係によって示し、図6, 7には交差角が0°と90°の場合の結果をレイノルズ数と摩擦損失係数の関係によって示している。なお、図6, 7に示す乱流域における摩擦損失係数 λ の算式は水を用いて試験を行った結果より求めたものである。なお図3～5はそれぞれ層流域と乱流域を各図中において区別し、各流動域における磁場と渦度の干渉およびレイノルズ応力の状態について注記している。

これらの諸試験結果を相互に比較することによって

Table 1 Properties of magnetic fluid

Density kg/m ³	Viscosity mPa·s	Volume concentration	Solvent
1243 (20℃)	4.682 (20℃)	0.060 (20℃)	water
1162 (20℃)	2.713 (20℃)	0.038 (20℃)	water

Fig. 3 Shear stress where $\theta = 0^\circ$ Fig. 4 Shear stress where $\theta = 45^\circ$ Fig. 5 Shear stress where $\theta = 90^\circ$

次の事項が明らかになる。

(1) 交差角が 0° の場合、せん断速度が小さな領域 (層流域) では磁場強さを変えてもせん断抵抗値はほとんど変わらない。しかし、せん断速度が増大すると (乱流域) 磁場強さによってせん断抵抗に差異が生じるようになり、磁場強さが大になるほど抵抗値が減少する。

(2) 交差角が 90° の場合、層流域においては磁場強さを増大すると抵抗が増大する。しかし乱流域にお

Fig. 6 Pipe friction factor where $\theta = 0^\circ$ Fig. 7 Pipe friction factor where $\theta = 90^\circ$ Fig. 8 Pipe friction factor for high Reynolds number where $\theta = 0^\circ$ Fig. 9 Pipe friction factor for high Reynolds number where $\theta = 90^\circ$

いては抵抗が磁場の強さによって変わらなくなり、ほぼ一定値を示すようになる。

(3) 交差角が45°の場合には上述の交差角0, 90°の両者の中間の結果が得られている。

図6, 7に示すレイノルズ数と摩擦損失係数の関係においては最大レイノルズ数の値が5000に達していなかったために、濃度3.8%の磁性流体を用いてさらに高い値のレイノルズ数まで実施した試験結果を図8, 9にそれぞれ交差角0, 90°の場合について示している。これらの諸試験においては、いずれもレイノルズ数の値は最大 10^4 程度となっているが、前述の濃度6%の場合と同様な結果が得られている。

これらの結果を総合すると式(1)の右辺第2項に示すレイノルズ応力が、磁場によって流れの乱れが抑制される結果、磁場強さが大きくなるほどその値が小さくなると考えるのが妥当である。すなわち交差角が0°の場合には、式(1)右辺の磁場と流れの渦度の干渉による抵抗を示す τ_m は極めて小さいから、乱流域においてレイノルズ応力が磁場の作用によって減少すれば、それだけ全抵抗は減少することになり、その減少度は磁場強さが大きいほど大となる。他方交差角が90°の場合には、 τ_m によって抵抗が増大するが、乱流域においてはレイノルズ応力が減少するため、これらの両効果が打ち消し合う結果、全抵抗は磁場強さに関係なくほぼ同様な値になるものと考えることができる。

本研究においては二次元流路を用いることにより、磁場と渦度との干渉に起因する流動抵抗を全流動抵抗から切り離して考察を行っている点がその特徴である。先に引用した論文[文献(1), (2)]はともに円管

を用いて試験が行われているために上述のような流動抵抗の分離を行うことが困難になる。引用論文⁽¹⁾においても乱流域において管径が1.9 mmの場合には磁場強さが大なほど抵抗が低下しており本研究と同様な結果が得られているが、管径が変わるとその状況は変わってくることが同論文に示されている。また実際引用論文⁽²⁾においては管径が5.5 mmであるが乱流域における抵抗はレイノルズ数が引用論文⁽¹⁾と同一な領域において磁場の強さに無関係となっている。これは前述の図4～6の結果をもとにすると磁場と渦度の干渉による抵抗の全抵抗に占める割合が管径により変化することによるものと考えることができる。二次元流路を用い流動抵抗の分離を行うことによって、円管では必ずしも明らかにできなかった現象の一般性を類推することが容易になると思われる。

6. 結 言

磁性流体の流動抵抗に及ぼす磁場の影響について、磁場と渦度の干渉による流動抵抗が分離できる二次元流路を用いて検討を行った。その結果、乱流域においても層流域の場合と同じように磁場と渦度の干渉による抵抗増加があるものの、乱流抵抗において大きな割合を占めるレイノルズ応力が磁場による乱れの抑制効果により減少する結果、全抵抗値が磁場の作用によって減少するメカニズムを明らかにした。

文 献

- (1) 須藤浩三・ほか4名, 機論, 49-440, B(1983), 818.
- (2) Kamiyama, S., ほか2名, *J. Mag. Mag. Mate.*, 39(1983), 23.
- (3) 松野善之・ほか2名, 機論, 57-543, B(1991), 3674.